Aus der Orthopädischen Klinik der
Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktor: Prof. Dr. med. A. N. Witt

# Zur Morphologie der Membrana interossea antebrachii

Inaugural - Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde der gesamten Medizin an der
Medizinischen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München

von
Konrad Schmid
aus München

1978

1979

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter Priv. Doz. Dr. W. Küsswetter
Mitberichterstatter Prof. Dr. A.N. Witt

Tag der mündlichen Prüfung: 8.2.1979

Gliederung

A Einleitung

B Morphologie der Bindegewebe

1.Textur

2.Fasern

3.Insertion am Knochen

C Vergleichende Anatomie

D Makromorphologische Aspekte der Membrana interossea antebrachii

E Eigene Untersuchungen

1.Material und Methode

a)makromorphologische Untersuchungen
b)stereomikroskopische Untersuchungen
c)licht-und polarisationsmikroskopische Untersuchungen
d)Raster-elektronenmikroskopische Untersuchungen

2.Ergebnisse

a)makroskopische Ergebnisse
b)stereomikroskopische Ergebnisse
c)licht-und polarisationsmikroskopische Ergebnisse

F Diskussion

G Zusammenfassung

## A. Einleitung

Die Membrana interossea spannt sich als stabilisierendes Element zwischen Radius und Ulna aus.Sie nimmt den größten Teil des Zwischenknochenraumes ein.Die Membrana interossea dient als Muskelursprungsfeld und ist wesentlich an den Umdrehbewegungen (Pronation und Supination) des Unterarms beteiligt.
Pathologische Veränderungen der Membrana interossea, insbesondere Narbenbildungen oder Schrumfungen, können somit zu Störungen der Unterarmumwendbewegung,zu Pronations-oder Supinationskontrakturen führen.Als Ursachen derartiger pathologischer Veränderungen kommen in erster Linie Verletzungen der Membrana interossea in Zusammenhang mit Unterarmfrakturen oder entzündliche Vorgänge,wie z.B.eine Unterarmphlegmone,in Betracht.
Da bisher nur wenige Ergebnisse nicht nur über Funktion,sondern auch über die Morphologie der Membrana interossea antebrachii vorliegen,war es Aufgabe unserer Arbeit,genauere Informationen über ihre makroskopische und mikroskopische Struktur zu gewinnen.Im besonderen wurden der Insertionsmodus der Membrana interossea an Ulna bzw.Radius, sowie altersabhängige Unterschiede berücksichtigt.

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

## B. Morphologie der Bindegewebe

### 1. Textur

Leonhardt (17) unterscheidet zwei grundsätzliche Organisationsformen kollagenfaserigen Bindegewebes: zum einen das lockere faserarme Bindegwebe, zum anderen das straffe faserreiche Bindegewebe.
Das lockere Bindegewebe begleitet als interstitielles Bindegewebe Nerven und Gefäße in die Organe hinein und verbindet als Stroma die spezifischen Gewebsanteile. Lichtmikroskopisch findet man in den weiten zwischenzelligen Räumen Strähnen von leicht gewellten Kollagenfasern, locker angeordnet im Verband mit spärlichen elastischen Netzen.
Das straffe faserreiche Bindegewebe unterteilt sich in geflechtartig und parallelfaserig organisiertes Bindegewebe.
Das straffe geflechtartige Bindegewebe ist gekennzeichnet durch ein filzartiges Geflecht von Kollagenfaserbündeln (Vorkommen: Corium und Dura Mater).
Als Prototyp des straffen parallelfaserigen Bindegewebes gilt die Sehne, bei der Kollagenstrukturen durch Zugkräfte einer Ausrichtung unterworfen werden. Das die Sehne umgebende Peritenonium externum wiederum ist dem straffen geflechtartigen Bindegewebe zuzurechnen.
Im Gegsatz zu Leonhardt (17) wurde das faserreiche Bindegewebe von Kaiser und Stockinger in sechs Gruppen unterteilt, deren mengenmäßige Zusammensetzung und Vorkommen in folgender Tabelle aufgeführt sind:

Tabelle 1

Faserreiches Bindegewebe :

| Bezeichnung | Zellen | Fasern | Grundsubstanz | Vorkommen |
|---|---|---|---|---|
| interstitielles Bindegewebe | + + | + + | + + | Begleitbindegewebe |
| membranöses Bindegewebe | + + | + + | + | Peritoneum, Pleura |
| geflechtartiges Bindegewebe | + | + + + | + | Lederhaut, Dura |
| straff geflechtartiges Bindegewebe | + | + + + | + | Kapseln |
| straff gekreuztfaserig. Bindegewebe | + | + + + | + | Fascien, Aponeurosen |
| parallelfaseriges Bindegewebe | + | + + + | + | Sehnen, Bänder |

nach Kaiser, Stockinger (1971) (15)

Das jugendliche Bindegewebe ist gekennzeichnet durch eine lockere Ordnung sehr dünner Kollagenfibrillen,die einen gleichförmigen Aufbau zeigen. Im Verlauf der Reifung wird eine dichtere Packung der Kollagenfibrillen zu Bündeln sichtbar.Auch der Durchmesser der einzelnen Kollagenfibrillen nimmt zu.Das Verhältnis der Kollagenfibrillen zur Grundsubstanz verschiebt sich zugunsten der ersteren. Polarisationsoptisch läßt sich die Dichtezunahme der Fasern in der Zunahme des Grades der Doppelbrechung messen.Lichtmikroskopisch ist das unreife Bindegewebe gekennzeichnet durch seinen Reichtum an Zellen mit noch wenig ausdifferenzierten Kernen. Im Verlauf des Alters kommt es zu einer kontinuierlichen Abnahme des Wassergehaltes.Die Dichte des Gewebes nimmt in gleichem Maße zu.Die Faserstruktur ändert sich durch Verlust elastischer Fasern und Zunahme kollagenen Materiels. ( Verzar (29) )

2. Fasern

Für die Funktion von Sehnen und Bändern sind, auch im Insertionsgebiet,vor allem die kollagenen Fasern von Bedeutung.
Als kollagene Fasern bezeichnet man verschieden dicke Bündel unverzweigter Fibrillen,die im isolierten Zustand leicht gewellt verlaufen,doppelbrechend sind und sich mit saurem Farbstoff färben.Als kleinste morphologische Einheit der kollagenen Fasern gilt die Fibrille mit einem Durchmesser von 500 - 600 Å .
Die retikulären Fasern (argyrophilen Fasern)stellen eine besondere Art von kollagenen Fasern dar,die im Gegensatz zu anderen kollagenen Fibrillenverbänden nicht in gröberen Bündeln,sondern in kleineren Einheiten meist netzartig angeordnet sind.Die färberischen Besonderheiten,die Imprägnierbarkeit mit

Silber,die stark positive PAS-Reaktion,beruhen auf einem Polysacharid bzw.Lipoidanteil von 4% bzw.10% .

Die elastischen Fasern erreichen Durchmesser von mehreren µm und sind im nativen Zustand durch ihr starkes Lichtbrechungsvermögen gekennzeichnet.Sie sind kaum doppelbrechend,im Gegensatz zu kollagenen Fasern gegen Kochen,Säure und Lauge resistent.An ihrem Aufbau sind fibrilläre und amorphe Komponenten beteiligt,wobei die zentral gelegenen amorphen Strukturen von tubulär erscheinenden Mikrofibrillen mit einem Durchmesser von 80 - 130 Å umgeben sind. ( Kaiser,Stockinger (1971) ) (15)

Die retikulären Fasern kommen außerhalb des retikulären Bindegewebes im lockeren kollagenfaserigen Bindegewebe vor.Ergebnisse elektronenoptischer Untersuchungen führten dazu,in der Retikulinfaser eine präkollagene Faser zu sehen.Es werden direkte Übergänge retikulärer in kollagene Fasern beschrieben.
Elastische Fasern kommen nur in Form von Netzen vor. Sie liegen als Begleitstrukturen der Kollagenfasern vor.( Leonhardt (1974) ) (20) .
Die elastischen Fasern,selbst um 100% dehnbar,sind entscheidend daran beteiligt,daß kollagene Bündel einer Sehne oder eines Bandes nach Beanspruchung wieder in die leicht gewellte Ausgangalage zurückkehren.Bei einer Kontraktion verschwinden diese Wellen,ein weiches Anziehen wird ermöglicht.
( Benninghof ) ( 3) .

3. Insertion

Bereits Havers (1691) wies auf die zwei grundsätzlichen Möglichkeiten der Bänder- bzw.Sehnen-Insertion hin.Zum einen stellte er fest,daß die Sehnenfasern vieler Muskeln in das Periost übergehen und Bestandteil des periostalen Bindegewebes werden.Zum anderen beobachtete er,daß Sehnen,die relativ großen Zugbelastungen ausgesetzt sind,das Periost durchbrechen und unmittelbar im Knochen inserieren.
Sharpey (1856) (27) beschreibt perforierende Fasern, die sich wie schräg oder senkrecht in ein Brett geschlagene Nägel in die Knochenlamelle hinein erstrecken.Jedoch schrieb er auch dem Periost die Funktion zu,den Halt von Sehnen und Bändern am Knochen zu erhöhen.
Dolgo-Saburow (1929) (10) unterschied im Insertionsbereich der Patellarsehne vier Zonen :

kollagene Sehnenfasern,
Faserknorpel,
mineralisierter Faserknorpel,
Knochen .

Cooper (1970) (9) bestätigte die Gültigkeit dieses Schemas.Er fand im Insertionsbereich ebenfalls vier unterschiedliche Zonen:

1) Band oder Sehne,bestehend aus mehr oder weniger parallelen kollagenen Fasern mit eingelagerten spindelförmigen Zellen.
2) Faserknorpel (150 - 400 µ breit):dieselben kollagenen Bündel setzen sich in diese Zone fort.Die Zellen lagern sich zu Paaren oder Reihen,werden rund,liegen in Lakunen einer extrazellulären Matrix zwischen Kollagenen und Fibrillen.
3) Mineralisierter Faserknorpel (100 - 300 µ breit): diese Zone ist von der letzten scharf abgegrenzt.Sie wird als blue line bezeichnet (geändertes färberisches Verhalten durch

Kalkeinlagerung),welche senkrecht zum Verlauf der kollagenen Fibrillen steht.

4) Lammellärer Knochen,der sich der unregelmäßigen Kontur des angrenzenden mineralisierten Faserknorpels anpaßt.

Cooper (9) weist auf die Möglichkeit einer rein periostalen Insertion hin,geht jedoch nicht auf ihre Struktur ein.

Ebenfalls zwei grundsätzliche Formen der Band-bzw. Sehnen-Insertion beschreibt Schneider (1958) (25). Im ersten Typ strahlen die kollagenen Fasern in ein zirkulär vollständig erhaltenes Periost ein. Dieser Insertionsmodus kann nach seiner Meinung nur für großflächige Ansatz-bzw.Ursprungszonen zutreffen, wie z.B. für den Ursprung des Muskulus triceps am Humerusschaft.Die kollagenen Fasern,ob einer Sehne oder einem Band zugehörig,stehen also bei einem derart breitflächigen Ansatz nicht direkt mit dem Knochen in Verbindung,sondern haften sich nur mittelbarmit Hilfe des Periost,das an dieser Stelle nicht durchbrochen ist,am Knochen an.

Die Anheftung des Periost am Knochen wiederum wird durch radiär,pinselförmig in den Knochen einstrahlende kollagene Fasern gewährleistet,die aus der äußeren Periostschicht,dem Stratum fibrosum,stammen (im Gegensatz zum inneren Stratum cellulare) . ( Leonhardt (1971))(20).

In völlig gegensätzlicher Weise inserieren nach Schneider (1958) (25) die epiphysär errichteten Sehnen mit kleinem Querschnitt.Sie verankern sich nicht im Periost,sondern sind im Knochen selbst eingemauert.Im Insertionsbereich fehlt das Periost.Die kollagenen Fasern durchsetzen im Insertionsbereich eine zunächst unverkalkte,schließlich verkalkte Knorpelzone,um sich dann den Knochenlamellen anzulegen. Knorpel-und Knochenzone sind verzahnt wie die Epidermis im Corium.Form und Größe der ineinander greifenden Knorpel- und Knochenzacken variieren

überaus,da der Feinbau der Ansatzzone von Alter, Geschlecht und Beruf abhängt.(Schneider (1958))(25). Die nicht epiphysär errichteten kleinflächigen Sehnenansatzzonen zeigen einen prinzipiell gleichartigen Aufbau.Sie sind periostfrei,der Knochen ist von einer Kalkschicht überzogen,in der sich zumindest vereinzelt Knorpelzellen finden. Senst (1974) (26) fand,daß die im Sehnenansatzbereich eingelagerte Faserknorpelzone in ihrer Dicke vom Ausmaß der Belastung abhängt.

C. Vergleichende Anatomie

Bei den Säugetieren bestehen beträchtliche Unterschiede in Ausgestaltung und Größenverhältnis von Radius und Ulna und insbesondere in der Fähigkeit der Pronation und Supination.

Bei den Huftieren (ausgenommen Rüsseltiere),den Nagern,den Hasenartigen,den Flattertieren (z.B.Fledermaus),den Seekühen und den Kloakentieren (z.B. Ameisenigel) sind Radius und Ulna,gewöhnlich in einer parasagittalen Achse liegend,starr miteinander verbunden.Eine Membrana interossea fehlt.

Bei den Walen findet sich die bemerkenswerte Tatsache,daß Radius und Ulna,in einer Frontalebene liegend,durch eine Membrana interossea verbunden sind,ohne daß die beiden Knochen gegeneinander beweglich sind.

Bei den Primaten,den Beuteltieren,den Insektivoren, den Landraubtieren,den Schuppentieren,den Zahnarmen (z.B.Faultier),den Robben und den Röhrchenzähnern (z.B.Erdferkel) hat der Radius,außen gelegen,die Fähigkeit,sich um die Ulna,die als fixiert angenommen wird,zu bewegen(Radio - Ulnar - Gelenke) . Eine Membrana interossea ist stets ausgebildet.Sie wird umso wichtiger,je ausgeprägter die Fähigkeit der Pronation und Supination ist. Ferner besteht vielfach bei den Säugetieren eine Beziehung zwischen dem relativen Größenverlust der Ulna und der Reduktion der Rotationsfähigkeit des Vorderarms.

Beim Menschen,bei dem der Umfang der Unterarmwendbewegung am größten ist,sind Radius und Ulna von etwa gleicher Größe und Stärke. ( Lessertisseur (1967))(21)

Während die Ulna von proximal nach distal an Stärke und Umfang abnimmt,gelten für den Radius gerade umgekehrte Verhältnisse.

## D. Makromorphologische Aspekte der Membrana interossea antebrachii

Nach Frick (1972) (12) verlaufen die Fasern der Membrana interossea vorwiegend schräg von lateral proximal nach medial distal,im distalen Teil auch in umgekehrter Richtung.Die Chorda obliqua wird als ein straffer Bandzug beschrieben,der,von der Tuberositas ulnae ausgehend,die Membrana interossea proximal begrenzt und einen zur Faserrichtung der Membrana entgegengesetzten Verlauf nimmt.Durch eine schlitzförmige Öffnung im proximalen Abschnitt treten die Vasa interossea dorsalia hindurch.Diese Lücke gibt Raum für die Tuberositas radii und die Bicepssehne,die bei der Pronation nach medial gedreht werden.

V.Lanz und Wachsmuth (1959) (19) beschrieben die Membrana interossea als platte,sehnige Bindegewebszüge,die in ihrem Mittelteil am stärksten sind und einen parallelen Verlauf aufweisen.Proximal und distal verliert die Membrana interossea diese einheitliche Faserung.Sie schickt ihre Fasern in mehrere Richtungen und kann auch mehrschichtig werden. Distal tritt,bedeckt vom Musculus pronator quadratus, ein Endast der volaren Zwischenknochengefäße auf den Handrücken.Im distalen Abschnitt gewinnt die Zwischenknochenhaut unmittelbaren Anschluß an den Recessus sacciformis des distalen Speichen-Ellen-Gelenks und geht mit Faserzügen auch in die Gelenkkapsel über.Zwischen Schrägseite und Ellenbogengelenk bleibt der Zwischenknochenraum unverschlossen.

Als erster beschäftigte sich Calasans (1937) (8) systematisch (85 autoptische Präparate) mit der Morphologie der Membrana interossea.Der Hauptteil der Membrana interossea füllt nach Calasans (im Gegensatz zu Lanz-Wachsmuth (19) ) den gesamten

Zwischenknochenraum aus,das heißt,er erstreckt sich von einer zur anderen Artikulation der zwei Unterarmknochen,wobei lediglich Lücken für die entsprechenden Gefäße ausgespart bleiben.Die Membrana interosea wird im distalen und proximalen Abschnitt dünner,verliert ihren parallelen Faserverlauf und wird zu einem immer dünneren,schlaffen,transparenten Streifen.

Als accessorische Faserbündel der Membrana interossea beschreibt Calasans (8) auf der volaren Seite:

1) Die Chorda obliqua.
   Sie liegt im proximalen Drittel und ist fast immer vorhanden (in 92% der Fälle) .
2) Dünne Bündel von Fasern,
   die,unmittelbar unterhalb der Chorda obliqua und parallel zu ihr gelegen,mit dem Hauptteil der Membrana interossea verbunden sind .
3) Ein flaches Bündel am Beginn des distalen Viertels (in 81% der Fälle),
   das an der Membrana interossea in Höhe der oberen Begrenzung des Musculus pronator quadratus haftet.

Als accessorische Faserbündel der dorsalen Seite nennt er:

1) Die Chorda obliqua posterior,
   die,am Ende des proximalen Drittels gelegen, so gut wie immer anzutreffen ist,jedoch von Fall zu Fall in Stärke und Verlaufsrichtung variiert.
2) Verschiedene Bündel,deren Häufigkeit und Masse abnehmen,wie sie weiter distal liegen:
   a) ein Band,das mit dem Ansatz des Musculus extensor pollicis brevis verbunden ist ( in 88% der Fälle ) .

b) ein distal von dem oben beschriebenen Band gelegenes Bündel,das mit dem Ansatz des Muskulus extensor pollicis longus in Verbindung steht ( in 40% der Fälle ) .

3) Kleinere Bündel am distalen Ende der Membrana interossea von unterschiedlicher Länge und Ausrichtung.

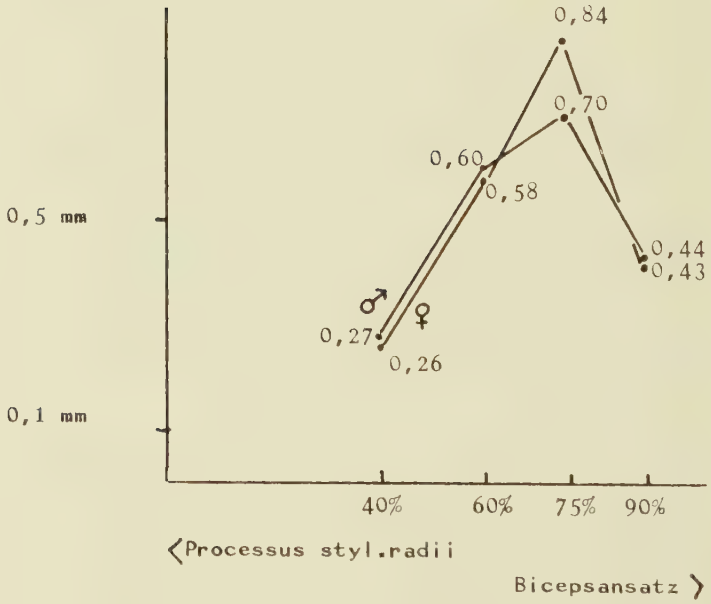
Kindler (1976) führte an 25 autoptischen Unterarmpräparaten Dickenmessungen der Membrana interossea durch.
Die Messpunkte lagen,bezogen auf eine Strecke vom Processus styloideus radii bis zum Ansatz des Musculus biceps brachii,bei 40%, 60%, 75% und 90% .
Die Dicke der Membrana interossea wurde jeweils am radialen Rand und in der Mitte zwischen beiden Unterarmknochen bestimmt.

Der niedrigste Durchschnitt der Dicke der Membrana interossea lag mit 0,262 mm (Frauen) im distalen Bereich in der Mitte zwischen den beiden Unterarmknochen.Der höchste Durchschnittswert ergab sich mit 1,071 mm (Männer) am radialen Rand des dritten Meßabschnitts (75%) .
Kindler fand,daß das Dickenmaximum der Membrana interossea im mittleren Bereich des Unterarms liegt, das Dickenminimum im distalen Abschnitt.Am ulnaren Rand erreicht die Membrana interossea ihre größte Dicke weiter distal (bei 60%) als am radialen Rand (bei 75%) oder in der Mitte zwischen Radius und Ulna (bei 75%) .

(Siehe Abb.1)

Abb. 1

Dicke der Membrana interossea in der Mitte zwischen beiden Unterarmknochen; nach Kindler (1976)



## E. Eigene Untersuchungen

### 1. Material und Methode

Die Untersuchungen erfolgten an menschlichen Unterarmpräparaten,die autoptisch entnommen worden waren,und bei denen die Membrana interossea sowie die Chorda obliqua freipräpariert worden waren.

a) Makromorphologische Untersuchnungen:
Ausdehnung der Membrana interossea am Unterarm;
Bestimmung der Faserrichtung;
Verstärkungszüge;

Im makroskopischen Bereich bestimmten wir an zehn präparierten Unterarmen den Faserverlauf im gerichteten Anteil der Membrana interossea.Zur eindeutigen Darstellung der Faserrichtung bedienten wir uns der Spaltmethode nach Hultkrantz (1898) (14) , die erstmals zur Darstellung der Faserrichtung des Gelenkknorpels verwendet wurde,und die sich nach Benninghof, (1928a) (1) , (1928b) (2) , (1931) (3) , auch zur Darstellung des Faserverlaufs in faserreichem Bindegewebe eignet.Wir wandten die modifizierte Methode nach Konermann (1971) (16a) an.
Wir bestrichen die Membrana interossea an beiden Seiten mit verdünnter Plakafarbe und stachen sowohl von dorsal als auch von palmar millimeterweise mit einer Stecknadel in die Membrana interossea.
Es ergaben sich feine Spalten,die die aufgetragene Plakafarbe aufnahmen.Die in die Spalten eingedrungene Farbe blieb auch nach Abwaschen mit Wasser fest haften,während der nicht in die Spalten eingedrungene Teil der Farblösung durch einfaches Abwaschen mit Wasser entfernt werden konnte.So ergab sich ein über die gesamte Membrana interossea sich ausdehnendes feines Rillenmuster,aus dem auf den Faserverlauf geschlossen werden konnte.Als Faserrichtungswinkel wurde der Winkel bestimmt,den die Membranfasern

mit der diagonalen Unterarmachse einschlossen.
Die Bänder-Membran-Knochen-Präparate wurden in einer Einspannungsvorrichtung,Zentrierspitzen und Knochenzwingen,fixiert.Die Einspannung erfolgte so, daß die diagonale Unterarmachse genau senkrecht zur Bodenplatte der Halterung stand ( Abb. 2 ).
Die Winkelmessung erfolgte in Neutralnullstellung. Die Fixierung in Normalnullstellung erfolgte dadurch,daß das zuvor entnommene distale Humerusgelenkstück wieder mit dem Ellenbogengelenk verbunden wurde und in rechtwinkelige Beugung des Ellenbogengelenks parallel zur Facies carpea radii ausgerichtet wurde.Mit Hilfe von Maßband und Winkelmesser bestimmten wir von proximal nach distal in Abständen von jeweils 1 cm den spitzen Winkel,den die Fasern der Membrana interossea mit der Achse der Unterarmumwendbewegung einschlossen. ( Abb. 2 )

Für Fasern,die von radial proximal nach ulnar distal laufen,gaben wir den Winkel positiv an.
Für Fasern,die von radial distal nach ulnar proximal ziehen,erhielt der Winkel ein negatives Vorzeichen.

b) Stereomikroskopische Untersuchungen:
Textur der Membrana interossea

Zur submakroskopischen Beurteilung der Fasertextur der Membrana interossea benutzten wir das Stereomikroskop,das Vergrößerungen von 8x bis 50x zuläßt.
Wir untersuchten sieben autoptische Präparate,die ebenfalls nach der modifizierten Hultkrantz'schen Spalmethode gestichelt worden waren.
Die Präparate stammten aus folgenden Altersgruppen:

| | | |
|---|---|---|
| B | ( 2.Monat bis 6 Jahre ) | 1 |
| C | ( 7 Jahre bis 19 Jahre) | 2 |
| D | (20 Jahre bis 60 Jahre) | 3 |
| E | ( über 60 Jahre) | 1 |

c) Licht-und polarisationsmikroskopische Untersuchungen der Membrana interossea und des Insertionsbereichs am Knochen

29 autoptische Unterarme dienten zur Gewinnung von Gewebsproben für lichtmikroskopische und polarisationsmikroskopische Untersuchungen.Sie verteilen sich folgendermaßen auf die verschiedenen Altersgruppen:

| | | | |
|---|---|---|---|
| A | ( 8.Fetalmonat | bis 2.Monat) | 6 |
| B | ( 2.Monat | bis 6 Jahre) | 6 |
| C | ( 7 Jahre | bis 19 Jahre) | 5 |
| D | ( 20 Jahre | bis 60 Jahre) | 6 |
| E | | ( über 60 Jahre) | 6 |

Aus den 29 bis auf die Membrana interossea präparierten Unterarmen excidierten wir je eine Gewebsprobe der Membrana interossea aus dem proximalen, dem mittleren und dem distalen Unterarmdrittel. Weiter excidierten wir Gewebsproben aus Radius und Ulna mit dem zugehörigen Anteil der inserierenden Membrana interossea,wiederum jeweils aus dem proximalen,dem mittleren und dem distalen Drittel.Die so erhaltenen 261 Gewebsproben wurden in Formalin (5%) fixiert,in Paraffin eingebettet,zu etwa 20 µ dicken Schnitten verarbeitet und folgendermaßen gefärbt:

1) Färbung in der Methode nach Gomori zur Imprägnierung feinster kollagener und argyrophiler Fasern.
2) Kombinierte Färbung: Resorcin-Fuchsin- und van Gieson-Färbung,bei der sich elastische Fasern schwarz,kollagene rot und Muskulatur gelb darstellen.
3) Färbung in der Methode nach Masson zur deutlichen Darstellung kollagener Strukturen.
4) Kernfärbung nach Giemsa.

5) Orcein-Färbung zur Darstellung von elsatischen Fasern,als Ersatz für die Resorcin-Fuchsin-van Gieson-Färbung.(Fuchsin wurde während der Versuchsdurchführung aus dem Handel gezogen.)

Diese histologischen Präparate wurden licht-und polarisationsmikroskopisch ausgewertet und tabellarisch erfaßt.

d) Raster-Elektronenmikroskopische Untersuchungen

Zur Beurteilung der Mikrostruktur im Insertionsbereich der Membrana interossea untersuchten wir 59 knöcherne Proben mit zugehörigem Membrananteil unter dem Raster-Elektronenmikroskop.Wir gewannen die Proben aus autoptischen Unterarmen verschiedener Altersgruppen.Die Proben wurden in Glutarbialdehyd (25%ig) (pH 7,2) fixiert und anschließend in 1/15 molarer Na-und K-Dihydrogenphosphat-Lösung gepuffert. Die Spaltung der Gewebsproben erfolgte nach der Gefrierbruchtechnik (Boyde und Wood (1969),Clarke (1971) ),das heißt,sie wurde mit einem feinen Meißel unter flüssigem Stickstoff durchgeführt ( -196°C ). Die Spaltungsebene verlief dabei durch das Zentrum des Ansatzes der Membrana interossea am Unterarmknochen,sowie in dessen Längsrichtung.
Wir erhielten so ein künstlich geschaffenes Oberflächenrelief an der Stelle,wo die Fasern der Membrana interossea in den Knochen eintreten.Die gespaltenen Proben wurden zunächst weiterhin in flüssigem Stickstoff konserviert und schließlich gefriergetrocknet, das heißt,der Wasserentzug aus dem Gewebe wurde unter Umgehung der flüssigen Phase in einer Vakuum-Pumpe durchgeführt.Nach Goldbedampfung erfolgte die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung bei Vergrösserungen von 50x bis 1000x.Es ließen sich jedoch mit dieser Methode keine aussagekräftigen Befunde erheben,sodaß dieses Untersuchungsverfahren verlassen werden mußte.

## 2. Ergebnisse

### a) Makroskopische Ergebnisse

Bei der Bestimmung des Faserverlaufs der Membrana interossea ergab sich in 6 von 10 Fällen im distalen Membranabschnitt ein schwacher Faserzug von radial distal nach ulnar proximal,das heißt,mit einer zum Hauptfaserverlauf der Membrana interossea entgegengesetzten Verlaufsrichtung.Der Winkel zur diagonalen Unterarmachse betrug dabei zwischen $-30^{\circ}$ und $-50^{\circ}$,die Länge dieses Membranabschnitts 1cm bis 2cm. In 9 Fällen fanden wir einen 1 bis 3cm breiten Abschnitt mit netzartigem Faserverlauf,der teilweise den distalen Endabschnitt der Membrana interossea bildete, teilweise sich mit dem oben beschriebenen entgegengesetzt verlaufenden Abschnitt überlagerte oder nach proximal dessen Fortsetzung bildete.

In 6 Fällen fand sich auf der Höhe des proximalen Randes des Musculus pronator quadratus ein distaler Querzug von 1-2cm Breite,der mit der diagonalen Unterarmachse einen Winkel von $80^{\circ}$-$90^{\circ}$bildete und nicht weiter als 3cm vom distalen Ende der Membrana interossea entfernt war.Der Hauptabschnitt der Membrana interossea,mit einem Faserverlauf von radial proximal nach ulnar distal,war 8-11cm lang.Er bildete in einem Fall das distale Ende der Membrana interossea,in den restlichen 9 Fällen schloß er sich an den netzartigen Abschnitt oder an den distalen Querzug an.Im distalen Bereich des Hauptabschnitts betrug der Winkel zur diagonalen Unterarmachse $30^{\circ}$-$35^{\circ}$. Dieser Winkel nahm zur Mitte des Hauptabschnitts hin annähernd kontinuierlich bis auf ein Minimum von $16^{\circ}$-$22^{\circ}$ ab,um wiederum beinahe kontinuierlich auf Werte von $42^{\circ}$-$46^{\circ}$ am proximalen Ende des Hauptabschnitts anzuwachsen.Das proximale Ende des Hauptabschnitts war identisch mit dem proximalen Ende

der gesamten Membrana interossea.Die Länge des Hauptabschnitts betrug 8 - 11 cm.
Die Errechnung von Mittelwerten des Faserverlaufswinkels der Membrana interossea erschien nicht sinnvoll,da einander entsprechende Membranabschnitte in ihrer Längenausdehnung variierten,sodaß vergleichbare Faserverlaufswinkel auf jeweils unterschiedlichen Meßpunkten des Unterarms lagen. (Siehe Tab.2 )

Eine Chorda obliqua anterior,auf dem proximal palmaren Abschnitt der Membrana interossea von ulnar proximal nach radial distal verlaufend,fanden wir in 8 unserer Fälle.Die exakte Verlaufsrichtung ließ sich in Winkelgraden nicht angeben (ca $-40^{o}$bis $-60^{o}$), da die Chorda obliqua anterior in Neutralnullstellung nicht die erforderliche Faserspannung besaß.

Eine Chorda obliqua posterior,auf dem proximal dorsalen Abschnitt der Membrana interossea verlaufend, war in 9 unserer 10 Fälle vorhanden.Der Winkel,den sie mit der Unterarmachse einschloß,betrug zwischen $-30^{o}$und $-48^{o}$,durchschnittlich $-42^{o}$.

Die beiden Chordae bilden selbständige,bandartige Einheiten,die der Membrana interossea lediglich aufgelagert sind.

Tab. 2

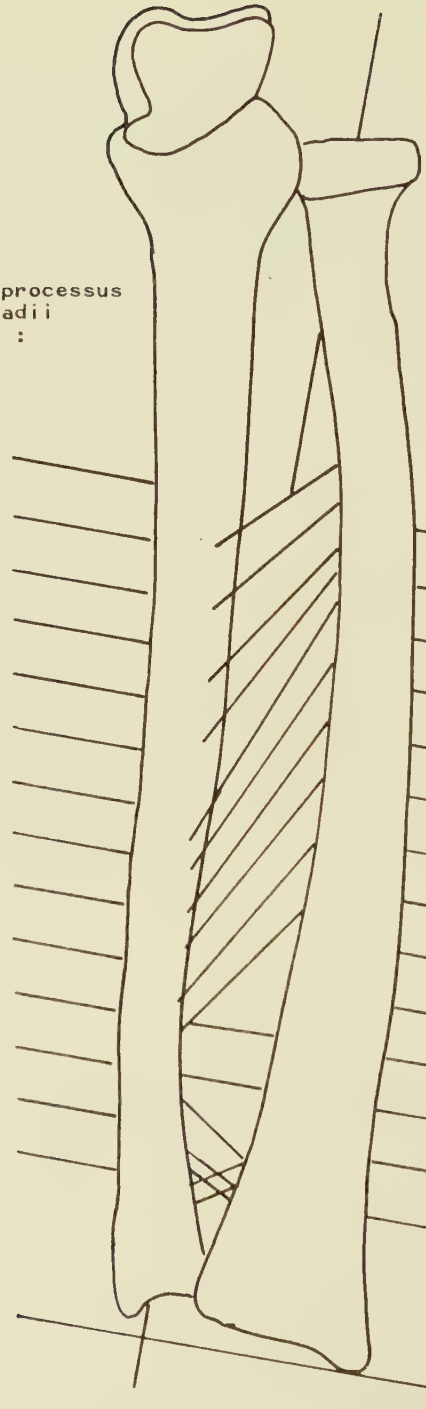
Winkel zwischen den Fasern der Membrana interossea antebrachii und der Unterarmachse

| Prap.Nr. | D52 | E18 | C 6 | C 7 | D57 | D53 | D47 | D51 | D60 | D59 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Entfernung vom Processus styloideus radii in cm | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | N | -30 | | |
| 4 | | | | -30 | | | N | -30 | -50 | |
| 5 | -40 | N | | -30 | | N90 | N | N | N | -35 |
| 6 | N | N | 30 | N | -25 | N | 90 | N | 90 | N |
| 7 | N | 80 | 25 | N90 | N | 30 | 35 | 36 | 35 | 80 |
| 8 | 30 | 32 | 20 | N90 | N | 25 | 24 | 18 | 24 | 80 |
| 9 | 20 | 25 | 23 | 36 | 30 | 25 | 25 | 19 | 22 | 35 |
| 10 | 16 | 18 | 17 | 34 | 30 | 22 | 20 | 17 | 18 | 25 |
| 11 | 22 | 30 | 22 | 26 | 22 | 18 | 20 | 18 | 18 | 17 |
| 12 | 18 | 16 | 18 | 24 | 20 | 19 | 18 | 24 | 19 | 18 |
| 13 | 22 | 18 | 24 | 22 | 22 | 20 | 25 | 35 | 38 | 19 |
| 14 | 22 | 24 | 24 | 24 | 21 | 24 | 34 | 48 | 43 | 20 |
| 15 | 34 | 22 | 35 | 30 | 40 | 44 | 46 | | | 32 |
| 16 | 45 | 44 | 45 | 44 | 44 | N45 | | | | 42 |
| Chorda obliqua posterior | | -30 | -30 | -32 | -39 | -40 | -35 | -47 | -48 | -35 |
| Chorda obliqua anterior | Ø | + | + | Ø | + | + | + | + | + | + |

( N = netzförmiger Faserverlauf )

Abb.2 :

Schema der Membrana interossea (ohne Chorda obliqua und Ch.obl.posterior)



b) Stereomikroskopische Ergebnisse

Die Untersuchungen mit dem Stereomikroskop ergaben, daß die Membrana interossea im distalen Endabschnitt bzw.im Anschluß an den Abschnitt des zur Hauptfaserverlaufsrichtung entgegengesetzten Faserverlaufs regelmäßig aus lockerem,netzartigem Bindegewebe aufgebaut ist.Die Länge dieses distalen Bereichs betrug 1 - 3cm.Ein gerichteter Faserverlauf fehlt hier völlig.Statt dessen findet sich ein Netzwerk feiner Fasern,die mit Hilfe der Stichelungstechnik keine Farbe aufnahmen,im polarisierten Licht jedoch aufleuchteten.

In einzelnen Fällen konnten wir auch im proximalen Endabschnitt der Membrana interossea einen Abschnitt von 1cm Länge mit lockerem,netzartig strukturiertem Bindegewebe nachweisen.

Abgesehen von diesen beiden Abschnitten im distalen und proximalen Bereich besteht die Membrana interossea ausschließlich aus kräftigen parallelen Fasern, die in ihrer Anordnung denjenigen einer Sehne oder eines Bandes entsprachen.

Wir fanden,daß die Membrana interossea,abgesehen von den beiden oben beschriebenen Endabschnitten mit lockerem Bindegewebe,in a l l e n A l t e r s g r u p p e n ausschließlich aus kräftigen parallelen Faserbündeln aufgebaut ist.

c) Licht- und polarisationsmikroskopische Ergebnisse

Histologisch untersuchten wir zunächst die Struktur des Insertionsbereichs der Membrana interossea an Radius bzw.Ulna.

Zwei grundsätzliche Insertionstypen mit entsprechenden Übergangsformen wurden gefunden.
Zum einen sahen wir eine periostale Insertion :
Die kollagenen Fasern legen sich hierbei tangential dem Stratum fibrosum des Periost an.Das Periost ist im Insertionsbereich durchgehend zirkulär erhalten und wird nicht von inserierenden Fasern durchbrochen.
Zum anderen fanden wir eine ossäre (sehnenartige) Insertion :
Die von der Membrana interossea herkommenden Fasern laufen hierbei radiär zum Knochen und dringen teilweise in die Knochenstruktur ein.Das Periost fehlt im Insertionsbereich.Chondrozytenartige Zellen liessen sich nachweisen.Eine blue line als Ausdruck des verkalkten Faserknorpels fand sich in einem Teil der Fälle.

Der augenfälligste Befund unserer Untersuchungen war die Unterschiedlichkeit des Insertionsmodus innerhalb der verschiedenen Altersgruppen.
Während wir in der Gruppe A (8.Fetalmonat bis 2 Monate) in allen 36 Proben aus 6 Unterarmpräparaten eine periostale Insertion fanden,ergab sich in den folgenden Altersgruppen ein kontinuierlicher Übergang zu einem größer werdenden Anteil des ossären Insertionsmodus bis hin zur Gruppe E (über 60 Jahre), bei der wir in 32 Proben eine ossäre Insertion,in 2 Proben eine periostale Insertion und in den beiden restlichen Proben Übergangsformen feststellten.
( Tab.10 )

Analoge Beobachtungen machten wir hinsichtlich der blue line.Sie trat erstmals in der Altersgruppe C (7Jahre bis 19 Jahre) auf,allerdings nur in einem einzigen Fall,12 mal in der Altersgruppe D (20 Jahre bis 60 Jahre) und 15 mal in der Gruppe E (über 60 J.).

Eine Differenzierung nicht nach Altersgruppen,sondern nach Unterarmabschnitten (proximales,mittleres,distales Drittel) ergab,daß die Membrana interossea im distalen Abschnitt vorwiegend periostal inseriert (in 34 von 58 Proben),während sich im mittleren bzw. proximalen Drittel periostale und ossäre Insertion etwa die Wage halten. ( Tab.8 )

Berücksichtigt man ausschließlich die Altersgruppen C , D , E (über 6 Jahre),wird die Tendenz,daß die Membrana interossea im distalen Abschnitt bevorzugt periostal inseriert,noch deutlicher :
Von je 34 Proben zeigten diejenigen aus dem distalen Drittel in 11 Fällen eine periostale Insertion.Die Proben aus dem mittleren bzw.proximalen Drittel dagegen zeigten nur in 3 bzw.2 Fällen eine periostale Insertion. ( Tab.7 )

Das Auftreten einer blue line korreliert dabei mit dem Anteil der Fälle von ossärer Insertion : Im mittleren bzw.proximalen Unterarmdrittel fanden wir 23 bzw.20 Fälle von ossärer Insertion der Membrana interossea und konnten in 12 bzw.10 Fällen das Auftreten einer blue line beobachten.

Im distalen Unterarmdrittel mit 16 Fällen von ossärer Insertion trat eine blue line lediglich 7 mal auf. ( Tab.9 )

Bei der Untersuchung der Insertionsgebiete an Radius und Ulna fanden wir,daß die Membrana interossea im proximalen und mittleren Drittel jeweils im selben Modus an Ulna und Radius inseriert.Das Verhältnis

ossäre Insertion zu periostale Insertion zu Übergangsform beträgt im Bereich der mittleren Ulna 13 : 2 : 2 .

Für den Bereich des mittleren Radius ergibt sich eine geringe Abweichung von 14 : 1 : 2 (bei den Altersgruppen C,D,E,das heißt,über 6Jahre).

Analog verhält sich der Insertionsmodus im proximalen Unterarmdrittel.Wir fanden für den Bereich der proximalen Ulna ein Verhältnis ossäre Insertion zu periostale Insertion zu Übergangsform von 10 : 0 : 7 ,für den Bereich des proximalen Radius einen Wert von 10 : 2 : 5 .

Im distalen Unterarmabschnitt dagegen inseriert die Membrana interossea in den Altersgruppen C,D,E am Radius vorwiegend össär,während sich an der Ulna ossäre und periostale Insertion etwa die Waage halten.Das Verhältnis ossäre Insertion zu periostale Insertion zu Übergangsformen beträgt für den distalen Radius 10 : 4 : 3 ,für die distale Ulna dagegen 8 : 7 : 2 .

Im Rahmen unserer feingeweblichen Untersuchungen beobachteten wir auch eine unterschiedliche Häufigkeit der Osteone im Insertionsbereich in den Altersgruppen C,D,E . Im mittleren Unterarmabschnitt fanden wir in 30 von 34 Proben eine durchschnittliche oder hohe Osteonendichte,in 4 Fällen eine niedrige.

Ähnliche Verhältnisse fanden wir im proximalen Unterarmdrittel mit 32 Fällen von durchschnittlicher oder hoher Osteonendichte im Insertionsbereich der Membrana interossea.

Dagegen wies das distale Unterarmdrittel in der überwiegenden Zahl der Fälle (in 26 von 34) eine geringe Osteonendichte von Radius und Ulna im Insertionsbereich auf.( Tab. 9 )

Die Dichte der Osteone korreliert also mit dem Modus der Insertion:
Im distalen Unterarmdrittel mit nur 17 von 34 Fällen von ossärer Insertion ( Tab. 7 ) fanden wir überwiegend eine geringe Osteonendichte (in 26 von 34 Fällen) .
Im mittleren Unterarmdrittel mit 27 von 34 Fällen von ossärer Insertion ergab sich nur in 4 von 34 Fällen eine geringe Osteonendichte.

Eine stark ausgeprägte V-förmige knöcherne Ausziehung der Unterarmknochen im Insertionsbereich der Membrana interossea fanden wir in unseren histologischen Präparaten in wechselnder Anzahl in den verschiedenen Unterarmabschnitten.
Regelmäßig ist die V-förmige Ausziehung lediglich im Bereich der mittleren Ulna und des mittleren Radius anzutreffen (Altersgruppen C,D,E).Im Bereich der proximalen Ulna fanden wir sie etwa in einem Drittel der Fälle.An proximalem Radius und distaler Ulna fehlt sie weitgehend.

Bei der histologischen Beurteilung der Membrana interossea für sich ergab sich als erstes Merkmal in allen Altersgruppen eine Abnahme der Dicke der Membrana interossea von der Mitte nach proximal,in noch ausgeprägterer Weise nach distal.Eine exakte quantitative Dickenbestimmung ließ sich histologisch nicht durchführen.
Im distalen Drittel der Membrana interossea fanden wir lockeres Bindegewebe,bei dem die einzelnen kollagenen Fasern keine Vorzugsrichtung erkennen ließen,sondern lediglich in einem unregelmäßigen netzartigen Verband mit weiten Zwischenräumen organisiert waren.Die Zahl der Zellen erschien gegenüber dem mittleren und proximalen Abschnitt der Membrana interossea vermehrt.

Im mittleren Abschnitt der Membrana interossea fanden wir ausschließlich dicht gepackte kollagene Fasern,die keine Zwischenräume freilassen und ihrem streng parallelen Verlauf gemäß dem Aufbau eines Bandes entsprechen.
Im proximalen Abschnitt entspricht die Membrana interossea in ihrer Textur dem mittleren.Lediglich am proximalen Ende ergab sich anstelle des bandartigen Aufbaus die Struktur von lockerem,netzartigem Bindegewebe,wie es für den distalen Membranabschnitt kennzeichnend ist.
Von der Hauptmasse der kollagenen Fasern mit einheitlichem,streng parallelen Verlauf ließ sich im mittleren und proximalen Abschnitt eine schmale, aus kollagenen Fasern bestehende Deckschicht abgrenzen,die der Membrana interossea auf beiden Seiten aufgelagert ist.Die Deckschicht entspricht in ihrer gekreuzt faserigen Struktur dem Peritenonium externum der Sehnen.Sie geht,auch im Falle einer ossären Insertion,unmittelbar in das Stratum fibrosum des Periost über.
Elastische Fasern konnten wir mit unseren Untersuchungsmethoden in keinem Abschnitt der Membrana interossea nachweisen.

Fotografische Dokumentation

Abb. A 1

Membrana interossea antebrachii, Palmarseite.
(Nach der Spaltmethode gesticheltes Präparat)

Abb. A 2

Membrana interossea antebrachii, Dorsalseite.
(Gesticheltes Präparat)

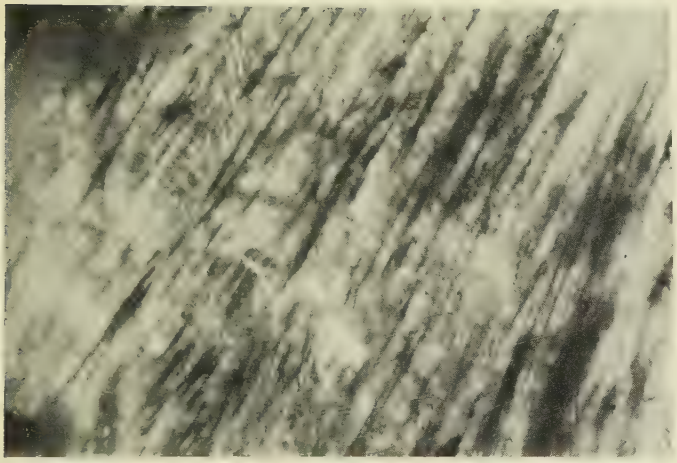


Abb. B 1

Parallelgerichtete Spaltlinienbilder, proximales Drittel der Membran, Palmarseite. (8-fach)

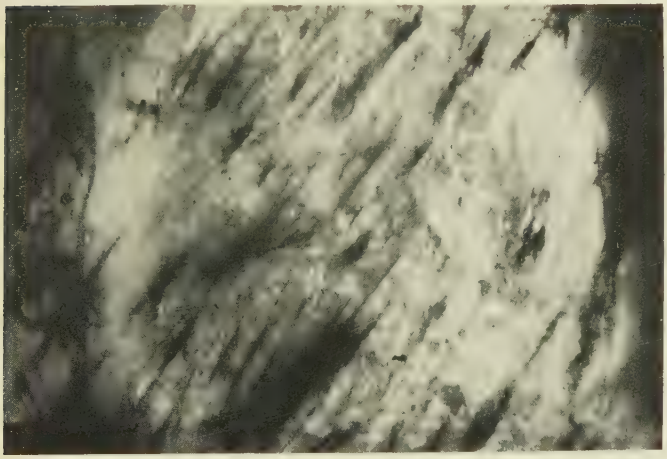


Abb. B 2

Übergangsbereich vom mittleren zum distalen Membrandrittel: neben Spaltlinien sternförmige Spaltpunkte. (8-fach)

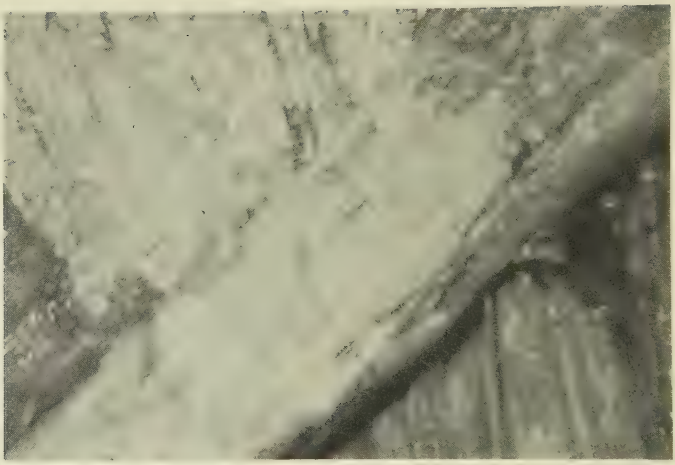


Abb. C 1

Spaltlinienbilder der dorsalen Membran und der aufgelagerten Chorda obliqua posterior. Entgegengesetzter Faserverlauf. (8-fach)

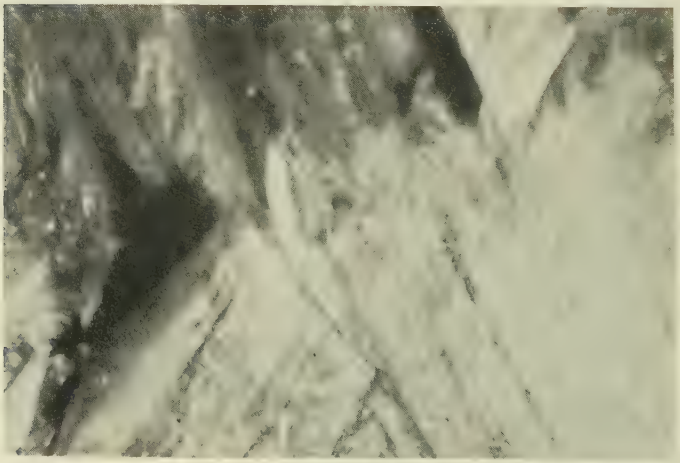


Abb. C 2

Spaltlinienbilder nach Durchtrennung der Chorda obliqua posterior. (8-fach)

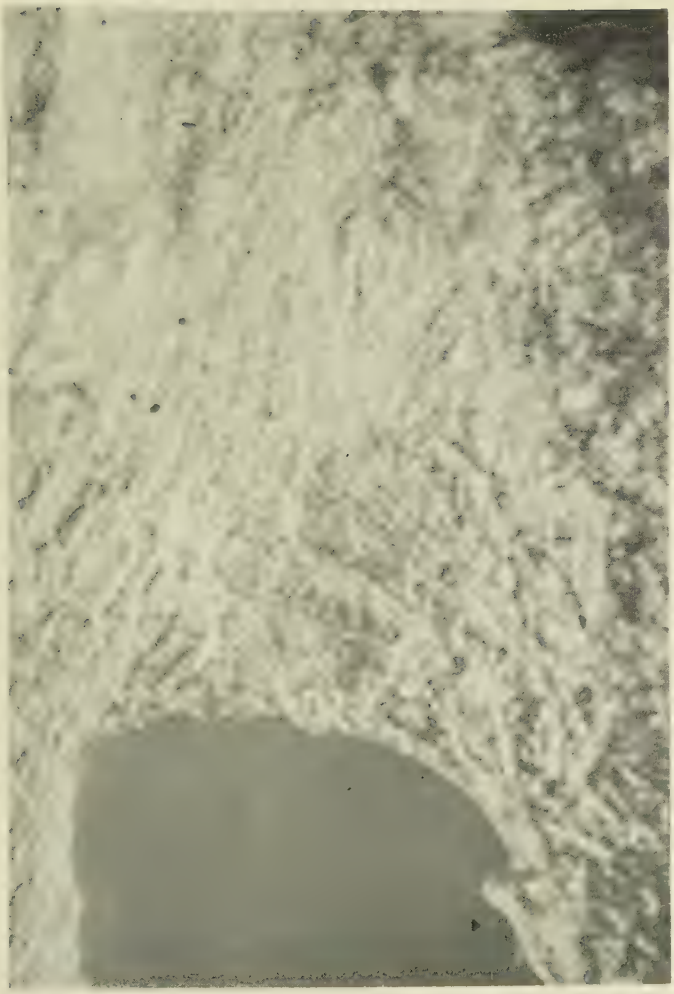


Abb. D 1
Proximales Membranende. (10-fach)

Abb. E 1

Ossäre Insertionsform der Membran am proximalen Radius (Fbg.Orcein, 125-fach).

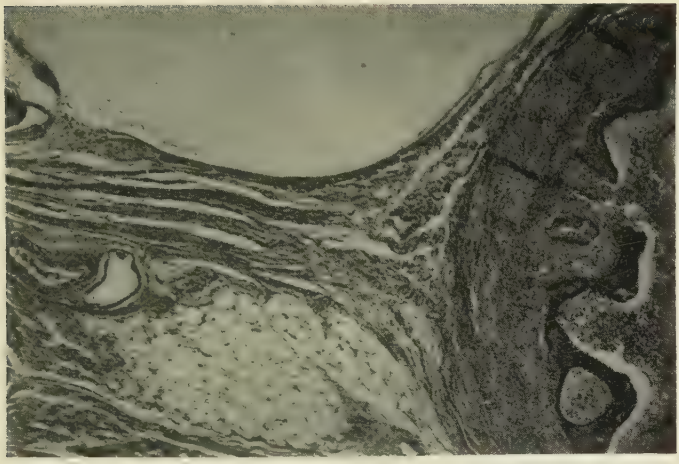


Abb. F 1

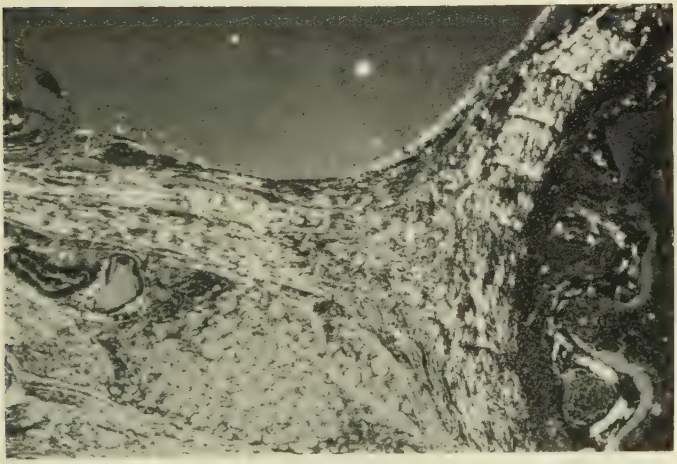


Abb. F 2

Abb. F 1 und F 2 :

Periostale Insertion der Membran am proximalen Radius (Fbg.Masson, 50-fach).

F1 : Lichtmikroskopie
F2 : Polarisationsmikroskopie

Abb. G 1

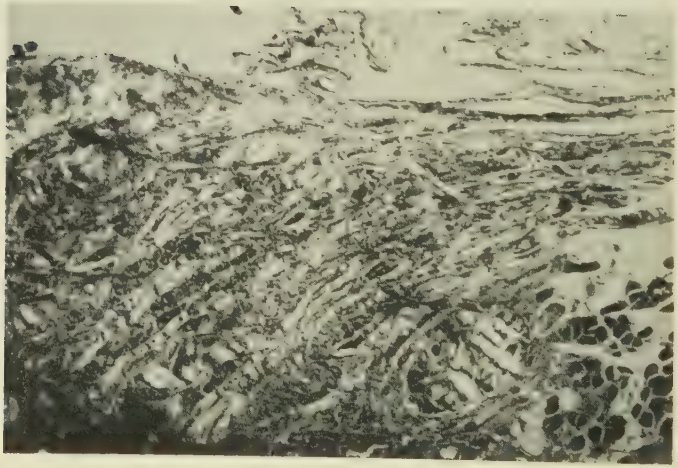


Abb. G 2

Abb. G 1 und G 2 :

Übergangsinsertionsform der Membran an der mittleren Ulna (Fbg.Giemsa, 125-fach).

G1 : Lichtmikroskopie
G2 : Polarisationsmikroskopie

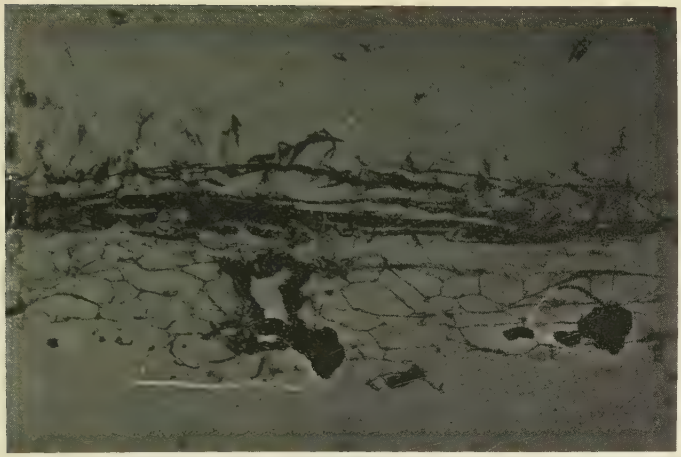


Abb. H 1

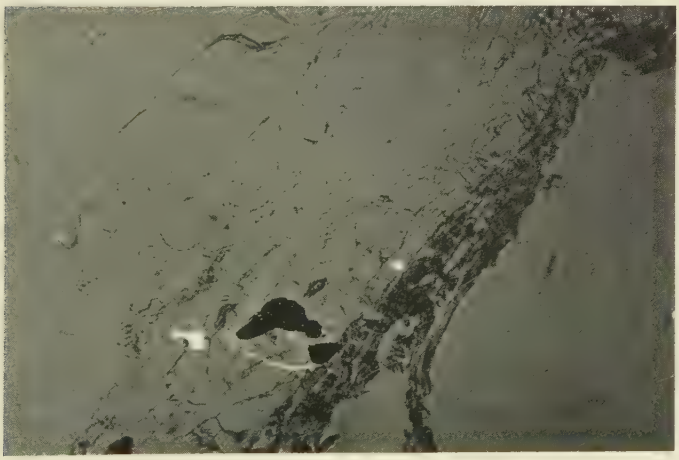


Abb. H 2

Abb. H 1 und H 2 :

Distales Membrandrittel.
Der mittleren Kollagenschicht ist zu beiden Seiten ein lockeres Gitternetz aufgelagert.

H1 : Fbg.Gömöry (125-fach)
H2 : Fbg.Gömöry (125-fach)

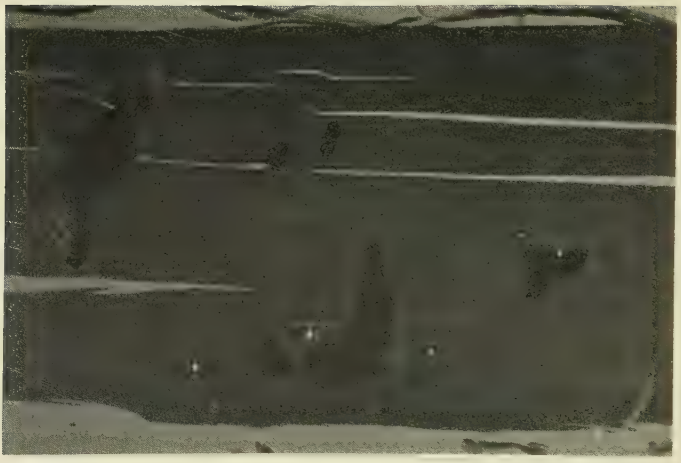


Abb. I 1

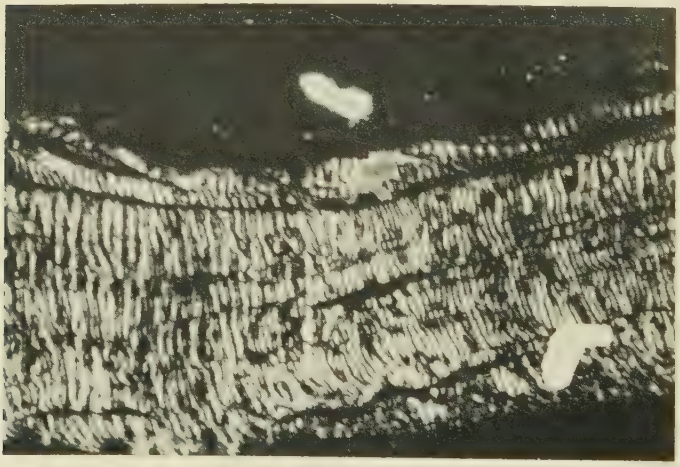


Abb. I 2

Abb. I 1 und I 2 :

Membran im proximalen Bereich.
Parallel-wellige Struktur der Fasern. (Fbg.Res.Fuchsin, 125-fach).

I1 : Lichtmikroskopie
I2 : Polarisationsmikroskopie

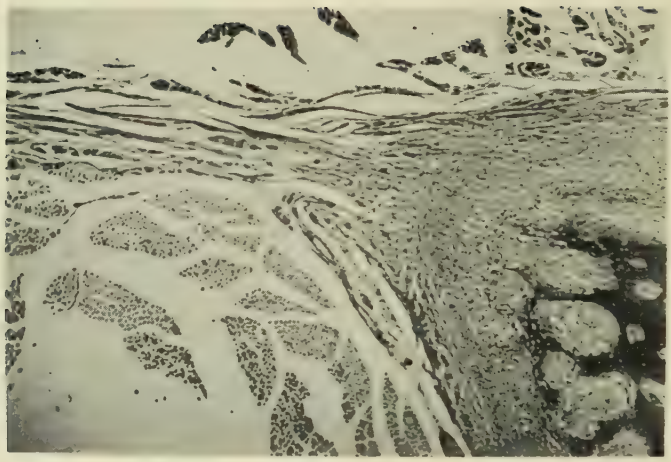


Abb. J 1

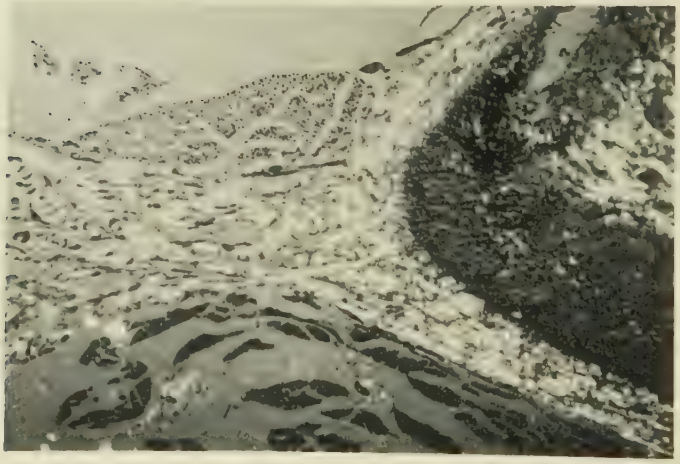


Abb. J 2

Abb. J 1 und J 2 :

Periostale Insertion der Membran an der mittleren Ulna. (Fbg.Masson, 50-fach)

J1 : Lichtmikroskopie
J2 : Polarisationsmikroskopie

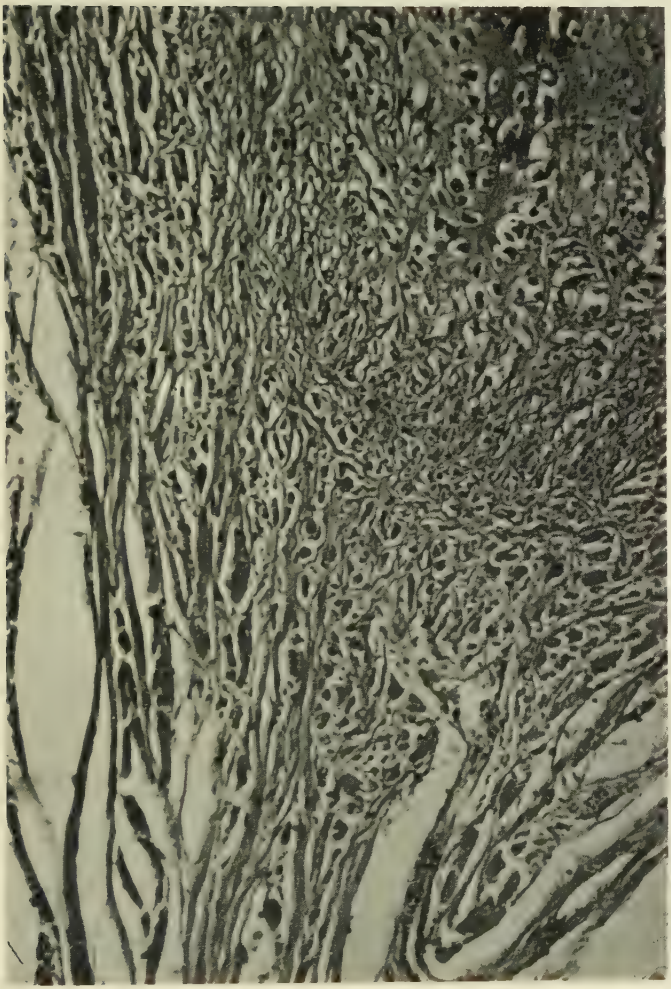


Abb. K 1

Übergangs-Insertionsform der Membran am mittleren Radius. (Fbg.Giemsa, 125-fach)

K1 : Lichtmikroskopie

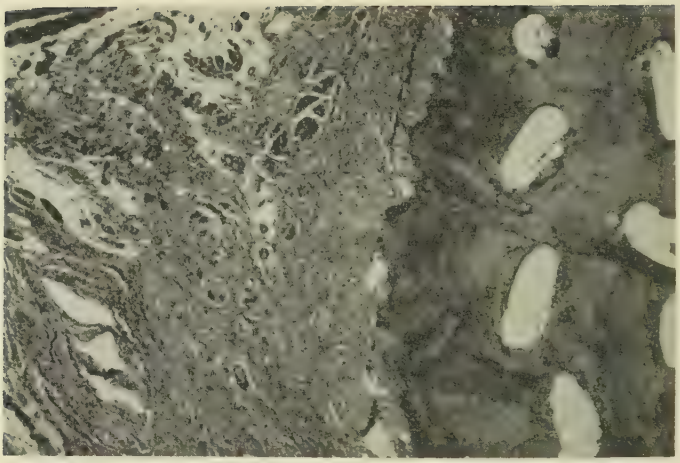


Abb. L 1

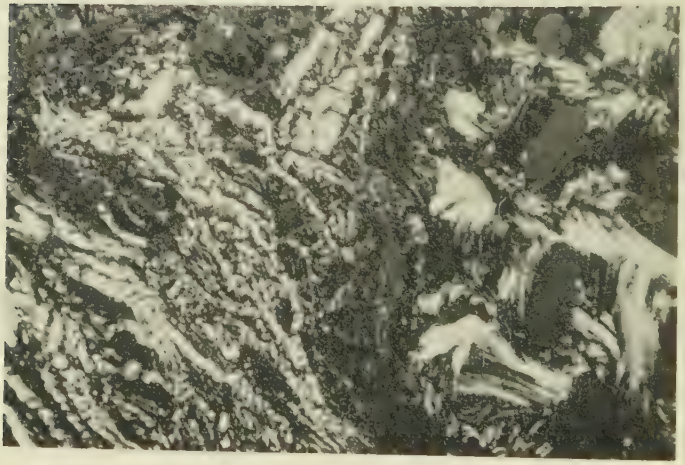


Abb. L 2

Abb. L 1 und L 2 :

Übergangs-Insertionsform der Membran am mittleren Radius. (Fbg.Masson, 125-fach)

L1 : Lichtmikroskopie
L2 : Polarisationsmikroskopie

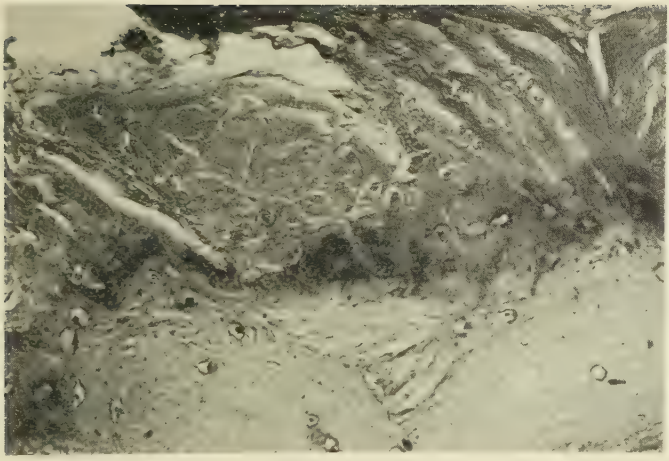


Abb. M

Ossäre Insertionsform der Membran.

4-Zonen-Aufbau des Insertionsgebietes :

1. Membranfasern
2. Unmineralisierte Zone mit knorpelähnlichen Zellen
3. Mineralisierte Zone mit knorpelähnlichen Zellen ("blue line")
4. Lamellärer Knochen

(Fbg.PAS, 320-fach)

## F. Diskussion

Der Unterarmumwendbewegung kommt entscheidende Bedeutung für den Bewegungsraum und die Gebrauchsfähigkeit der menschlichen Hand zu.

Bei jenen Säugetieren,die die vordere Extremität nur zur Fortbewegung gebrauchen (z.B.Huftiere), sind Radius und Ulna starr miteinander verbunden, und eine Membrana interossea fehlt.Hat dagegen die vordere Extremität eine zusätzliche Greiffunktion (z.B.Primaten,Landraubtiere),so besitzt der Radius die Fähigkeit,sich um die Ulna zu drehen.Eine Membrana interossea ist hier stets vorhanden.Sie wird umso wichtiger,je ausgeprägter die Fähigkeit zur Unterarmumwendbewegung ist.
Beim Menschen ist das Ausmaß der Pronation und Supination am größten. ( Lessertisseur,Saban (1967)) (21)

Die makroanatomische Beschreibung des Faserverlaufs der Membrana interossea durch Fick (1911)(12) , von Lanz und Wachsmuth (1959)(19) und Frick (1972) konnten wir in unseren Untersuchungen bestätigen.

Was die Häufigkeit der die Membrana interossea verstärkenden bandförmigen Strukturen betrifft,so wichen die Zahlen aus unseren Untersuchungen teilweise erheblich von den von Calasans (1937)(8) angegebenen Häufigkeiten ab.In unserem Kollektiv ( n = 64 ) fand sich für die Chorda obliqua anterior eine Häufigkeit von 86%,während sie Calasans in 82% der Fälle sah.Die Chorda obliqua posterior bzw. der distale Querzug war in unserem Untersuchungsgut in 92% bzw.in 56% vorhanden.Calasans gab eine Häufigkeit von 98% bzw.von 81% an.Diese Diskrepanz ist möglicherweise durch Unterschiede des Untersuchungsguts bedingt.Calasans hatte Präparate von 12 weißen

Individuen,14 Mulatten,43 negroiden Mestizen, 10 Japanern und 6 Individuen unklarer Herkunft untersucht,während unser Kollektiv aus Mitteleuropäern bestand.

Die von Calasans beschriebenen accessorischen Bündel,die mit den Ursprungssehnen verschiedener Muskeln in Verbindung stehen ( Musculus extensor pollicis longus,Musculus extensor pollicis brevis,Musculus pronator quadratus ),ließen wir unberücksichtigt, da es in vielen Fällen nicht möglich war,zu unterscheiden,ob es sich bei diesen Faserbündeln um Anteile der Membrana interossea oder bereits um Anteile der auf der Membrana interossea inserierenden Muskelfascien handelte.

Daß der gesamte Zwischenknochenraum von der Membrana interossea ausgefüllt wird,was Calasans fand,konnten wir nicht bestätigen.Wir sahen,ebenso wie von Lanz und Wachsmuth (1959)(19),eine freie Lücke zwischen Ellenbogengelenk und proximalem Ende der Membrana interossea.

Was den Vergleich der verschiedenen Altersgruppen betrifft,so fanden wir,daß die Umwandlung des jugendlichen Bindegewebes mit seiner weniger dichten Struktur kollagener Fasern und seinem Zellreichtum in das reife Bindegewebe sich nicht in allen Abschnitten der Membrana interossea mit der gleichen Geschwindigkeit vollzieht.Die lichtmikroskopischen (Dichtezunahme) und polarisationsoptischen Kriterien (Zunahme der Doppelbrechung) des reifenden Bindegewebes traten im mittleren Drittel der Membrana interossea bereits in der Altersgruppe C auf (7Jahre bis 19 J.), während teilweise das proximale und insbesondere das distale Drittel noch vorwiegend Züge des jugendlichen Bindegewebes trugen.

Bei der mikroskopischen Untersuchung des Insertionsbereichs fanden wir,daß die Membrana interossea bei foetalen und kindlichen Präparaten periostal inseriert und sich mit zunehmenden Alter eine Umwandlung vollzieht in Richtung auf einen ossären Insertionsmodus,wie ihn Schneider (1956) (25) , Cooper und Misol (1970) (9) und Senst (1974)(26) an Sehnen beschrieben.Die Tatsache,daß sich die Umwandlung vom periostalen zum ossären Insertionstyp im proximalen und mittleren Unterarmabschnitt bereits im jugendlichen Alter vollzieht,und daß im distalen Bereich die periostale Insertion erhalten blieb,hat nach unserer Meinung ihre Ursache in der stärkeren funktionellen Belastung des mittleren und proximalen Abschnitts der Membrana interossea.

Für die relativ höhere funktionelle Belastung des mittleren und proximalen Abschnitts sprechen auch unsere stereomikroskopischen Ergebnisse.Im mittleren und proximalen Abschnitt besteht die Membrana interossea aus kräftigen,gerichteten kollagenen Fasern, die im polarisierten Licht aufleuchten und in ihrer Textur dem parallelfaserigen Bindegewebe entsprechen, wie es ausschließlich in Sehnen und Bändern vorkommt. ( Kaiser,Stockinger (1971)) (15)

Im distalen Endabschnitt der Membrana interossea sahen wir regelmäßig einen 1 - 3cm langen Abschnitt, der aus lockerem,feinfaserigem,netzartigem Bindegewebe bestand.Seiner Textur nach muß das Bindegewebe des distalen Endabschnitts dem interstitiellen Bindegewebe ( Kaiser,Stockinger (1971)) (15) zugeordnet werden,das im Vergleich zum parallelfaserigen weniger Fasern,jedoch mehr Grundsubstanz und eine höhere Zahl von Zellen aufweist.Im polarisierten Licht leuchteten die Fasern des netzartigen distalen Endabschnitts auf.Sie sind daher als kollagene Fasern zu betrachten.Entsprechend der vermuteten stärkeren

funktionellen Belastung sahen wir im proximalen Endabschnitt der Membrana interossea nur in einzelnen Fällen eine lockere,netzartige Textur,die sich auf eine Länge von bis zu 1cm ausdehnte.

Die Membrana interossea entspricht im proximalen und mittleren Abschnitt in ihrem Aufbau einem kräftigen interossären Band mit einheitlichem Faserverlauf.Im distalen Abschnitt besteht sie aus lockerem Bindegewebe.Neben anderen Ursachen kann dies ein Grund dafür sein,daß Unterarmschaftfrakturen,insbesondere im mittleren und proximalen Bereich mit einer hohen Komplikationsrate behaftet sind,wie Pronations- und Supinationskontrakturen oder Pseudoarthrosenbildung. ( Knight und Puris (1951)) (16) , ( Böhler (1951)und(1953)) (5)und(6) , ( Witt und Rettig (1959)) (30) , ( Lange (1962)und(1967)) (17) und (18)u.v.a.
Narbenbildungen und Schrumpfungen der Membrana interossea führen,gerade wenn sie im kräftigen proximalen oder mittleren Drittel auftreten,zur Einschränkung der Unterarmumwendbewegung.

Der von Witt (1948) (31) und Witt et al (1972) (32) beschriebene Radiussporn beim Krukenberg - Greifarm betrifft meist den proximalen oder mittleren Abschnitt und entspricht röntgenologisch häufig dem Faserverlauf der Membrana interossea.

Bei Unterarmschaftfrakturen ist insbesondere im proximalen und mittleren Abschnitt eine exakte Achsen- und drehgerechte Reposition anzustreben.Um durch Frühmobilisation die Gefahr der Membranschrumpfung im ligamentären Abschnitt zu verringern,ist bei Erwachsenen eine stabile Osteosynthese die Metode der Wahl.Kindliche Unterarmschaftfrakturen sind hinsichtlich Achsenfehlstellung und Membranschrumpfung mit einer weit geringeren Komplikationsrate belastet.

( Blount (1957)) (4) , ( Ehalt (1961)) (11) ,
( Buck et al (1966)) (7) .
Daß Kinder Schrumpfungsprozesse an der Membrana interossea bis zu eienm gewissen Grad ausgleichen können,ist durch die allgemein größere Elastizität, also lockere Textur,zu erklären.Eine zusätzliche Rolle dürfte unserer Meinung nach der kindliche Insertionsmodus spielen,bei dem sich die Fasern der Membrana interossea vorwiegend im Stratum fibrosum des breiten Periostschlauches anheften,sodaß möglicherweise periostales Bindegewebe die Verkürzung der Membranfasern auszugleichen vermag.

## G. Zusammenfassung

Die Membrana interossea antebrachii besteht fast ausschließlich aus kräftigen,gerichteten,weitgehend parallelen kollagenen Fasern,die in ihrer Struktur denjenigen einer Sehne oder eines Bandes entsprechen. Dagegen findet sich regelmäßig im distalen Endabschnitt,sowie teilweise im proximalen Endabschnitt, ein Bereich von 1-3cm bzw. 1cm Länge mit lockerem, netzartigem Bindegewebe.

Die gerichteten kollagenen Fasern verlaufen im distalen Bereich von ulnar proximal nach radial distal.Proximalwärts schließt sich ein Abschnitt mit einem auf der Unterarmachse senkrecht stehenden Faserverlauf ,der distale Querzug,an.Dieser wird weiter proximal vom Hauptteil der Membrana interossea mit einem Faserverlauf von radial proximal nach ulnar distal abgelöst.Der Winkel,den die Fasern des Hauptteils mit der Unterarmachse bilden,nimmt vom proximalen wie vom distalen Ende des Hauptteils her zu dessen Mitte hin beinahe kontinuierlich ab,das heißt,die Fasern des Hauptteils verlaufen in seinem mittleren Abschnitt steiler als an seinem proximalen und distalen Endabschnitt.Von der eigentlichen Membrana interossea lassen sich in ihrem proximalen Bereich die Chorda obliqua anterior und die Chorda obliqua posterior als selbstständige,bandartige Strukturen abgrenzen.

Der Insertionsmodus der Membrana interossea antebrachii an Ulna und Radius ist bei den fetalen bzw. kleinkindlichen Präparaten ausschließlich bzw.vorwiegend periostal,während im Erwachsenen- und Greisenalter die ossäre Insertion überwiegt.
Diese Umwandlung von periostaler in ossäre Insertion vollzieht sich jedoch nicht in allen Unterarmabschnitten mit der gleichen Geschwindigkeit.Sie ist

im distalen Unterarmdrittel erst bei älteren Individuen zu beobachten,teilweise bleibt im distalen Unterarmabschnitt auch bei älteren Individuen die periostale Insertion erhalten.

Das Auftreten einer blue line ist vom Vorhandensein des ossären Insertionsmodus abhängig.

Die Dichte der Osteone an Radius und Ulna im Insertionsbereich steht in Zusammenhang mit dem Insertionsmodus.Im distalen Bereich mit vorwiegend periostaler Insertion ist die Zahl der Osteone pro Flächeneinheit wesentlich geringer als im proximalen und mittleren Abschnitt.

Tab. 3

Gruppe A : 6 Unterarmpräparate

| | | Distaler Unterarm-abschnitt | Mittlerer Unterarm-abschnitt | Proximaler Unterarm-abschnitt |
|---|---|---|---|---|
| Insertion | ossär | | | |
| | periostal | 6 | 6 | 6 |
| | Übergang | | | |

Gruppe B : 6 Unterarmpräparate

| | | Distaler Unterarm-abschnitt | Mittlerer Unterarm-abschnitt | Proximaler Unterarm-abschnitt |
|---|---|---|---|---|
| Insertion | ossär | | | |
| | periostal | 6 | 4 | 4 |
| | Übergang | | 2 | 2 |

Tab. 4

Gruppe C : 5 Unterarmpräparate

| | | Distaler ulnarer Abschnitt | Mittlerer ulnarer Abschnitt | Proximaler ulnarer Abschnitt | Distaler radialer Abschnitt | Mittlerer radialer Abschnitt | Proximaler radialer Abschnitt |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Insertion | ossär | 1 | 3 | | 1 | 3 | |
| | periostal | 3 | 2 | | 3 | 1 | 2 |
| | Übergang | 1 | | 5 | 1 | 1 | 3 |
| Osteone | viele | | | 1 | | | 1 |
| | mittel | | 2 | 3 | | 4 | 3 |
| | wenig | 5 | 3 | 1 | 5 | 1 | 1 |
| blue line | | | | 1 | | | |
| V-förmige knöcherne Ausziehung | | | 2 | | | 2 | |

Tab. 5

Gruppe D : 6 Unterarmpräparate

| | | Distaler ulnarer Abschnitt | Mittlerer ulnarer Abschnitt | Proximaler ulnarer Abschnitt | Distaler radialer Abschnitt | Mittlerer radialer Abschnitt | Proximaler radialer Abschnitt |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Insertion | ossär | 3 | 4 | 5 | 4 | 5 | 4 |
| | periostal | 2 | | | | | |
| | Übergang | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Osteone | viele | | 4 | 4 | 2 | 3 | 2 |
| | mittel | 2 | 2 | 2 | | 3 | 4 |
| | wenige | 4 | | | 4 | | |
| blue line | | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | |
| V-förmige knöcherne Ausziehung | | | 3 | 1 | | 4 | |

Tab. 6

Gruppe E : 6 Unterarmpräparate

| | | Distaler ulnarer Abschnitt | Mittlerer ulnarer Abschnitt | Proximaler ulnarer Abschnitt | Distaler radialer Abschnitt | Mittlerer radialer Abschnitt | Proximaler radialer Abschnitt |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Insertion | ossär | 4 | 6 | 5 | 5 | 6 | 6 |
| | periostal | 2 | | | | | |
| | Übergang | | | 1 | 1 | | |
| Osteone | viele | | 2 | 2 | | 4 | 3 |
| | mittel | 3 | 4 | 4 | 1 | 2 | 3 |
| | wenige | 3 | | | 5 | | |
| blue line | | 1 | 3 | 3 | 1 | 4 | 3 |
| V-förmige knöcherne Ausziehung | | | 3 | 2 | | 4 | |

Tab. 7

Gruppen C , D , E : 17 Unterarmpräparate

| | | Distaler ulnarer Abschnitt | Mittlerer ulnarer Abschnitt | Proximaler ulnarer Abschnitt | Distaler radialer Abschnitt | Mittlerer radialer Abschnitt | Proximaler radialer Abschnitt |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Insertion | ossär | 8 | 13 | 10 | 10 | 14 | 10 |
| | periostal | 7 | 2 | | 4 | 1 | 2 |
| | Übergang | 2 | 2 | 7 | 3 | 2 | 5 |
| Osteone | viele | | 6 | 7 | 2 | 7 | 6 |
| | mittel | 5 | 8 | 9 | 1 | 9 | 10 |
| | wenige | 12 | 3 | 1 | 14 | 1 | 1 |
| blue line | | 3 | 6 | 7 | 3 | 6 | 3 |
| V-förmige knöcherne Ausziehung | | | 8 | 3 | | 10 | |

Tab. 8

Gruppen A , B , C , D , E : 29 Unterarmpräparate

| | | Distaler Unterarm-abschnitt | Mittlerer Unterarm-abschnitt | Proximaler Unterarm-abschnitt |
|---|---|---|---|---|
| Insertion | ossär | 18 | 27 | 20 |
| | periostal | 34 | 23 | 22 |
| | Übergang | 6 | 8 | 14 |

Tab. 9

Gruppen C , D , E : 17 Unterarmpräparate

| | | Distaler Unterarm-abschnitt | Mittlerer Unterarm-abschnitt | Proximaler Unterarm-abschnitt |
|---|---|---|---|---|
| Osteone | viele | 2 | 13 | 13 |
| | mittel | 6 | 17 | 19 |
| | wenige | 26 | 4 | 2 |
| blue line | | 6 | 12 | 10 |
| V-förmige knöcherne Ausziehung | | | 18 | 3 |

Tab. 10

Gruppen A , B , C , D , E : 29 Unterarmpräparate

| | | Gruppe A | Gruppe B | Gruppe C | Gruppe D | Gruppe E |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Insertion | ossär | | | 8 | 25 | 32 |
| | periostal | 36 | 28 | 11 | 2 | 2 |
| | Übergang | | 8 | 11 | 9 | 2 |
| blue line | | | | 1 | 12 | 15 |

Literaturverzeichnis


1 Benninghof,A.

Form und Bau der Gelenkknorpel in ihrer Beziehung zur Funktion , 1.Mitteilung , Z.Anat.Entw.-Gesch.76 (1925) 43

2 Benninghof,A.

Form und Bau der Gelenkknorpel in ihrer Beziehung zur Funktion , 2.Teil , Zschr.Zellforschung 2 (1925) 783

3 Benninghof,A.

Funktionelle Anpassung im Bereich des Bindegewebes , Verh.dtsch.Ges.Anat.11 (1931) 95

4 Blount,W.P.
Knochenbrüche bei Kindern
Thieme, Stuttgart 1957

5 Böhler,l.

Die Technik der Knochenbruchbehandlung , Bd.1
W.Maudrich, Wien 1951

6 Böhler,l.

Die Technik der Knochenbruchbehandlung , Ergänzungsband ,
W.Maudrich, Wien 1963

7 Buck,P.,Foschveiller,l.,Jenny,G.

Über die Behandlung von 376 Vorderarmbrüchen bei Kindern,
Hefte Unfallheilkunde 89 (1966) 51

8 Calasans,M.O.

Observacoes sobre a morfologia da membrana interossea antebrachii e da membrana interossea cruris,
Arqu.Anat.Antropol.18 (1937)

9 Cooper,R.R.,Misol,S.

Tendon and Ligament Insertion,
J.Bone Jt.Surg.52-A (197)

10 Dolgo-Saburoff,B.

Über Ursprung und Ansatz der Skelettmuskeln,
Anat.Anz.68 (1929) 30

11 Ehalt,W.

Verletzungen bei Kindern und Jugendlichen,
Enke, Stuttgart 1961

12 Fick,R.

Handbuch der Anatomie und Mechanik der Gelenke, 3.Teil: Spezielle Gelenk-und Muskelmechanik,
G.Fischer, Jena 1911

13 Havers,

Osteologie Nova,
Smith, London 1691

14 Hultkrantz,J.W.

Über die Spaltrichtung der Gelenkknorpel,
Verh.d.anat.Ges.Kiel 1898

15 Kaiser,E.,Stockinger,L.

Morphologie und Biochemie der Bindegewebe,
Mü.Med.Wo.113 Jhrg.321

16 Knight,R.A.,Puris,G.D.

Fractures of both bones in the forearm in adults,
J.Bone Jt.Surg.32-A (1949) 755

16a Konermann,H.

Funktionelle Analyse der Knorpelstruktur des Talo-Naviculargelenkes,
Z.Anat.Entwicklunsgesch.133 (1971) 1-36

17 Lange,M.

Orthopädisch-chirurgische Operationslehre,
J.F.Bergmann, München 1962

18 Lange,M.

Lehrbuch der Orthopädie und Traumatologie,
Band 3,
Enke, Stuttgart 1967

19 v.Lanz,T.,Wachsmuth,W.

Praktische Anatomie,1.Band / 3.Arm,
Spriner,Berlin-Göttingen-Heidelberg 1959

20 Leonhardt,H.

Histologie und Zytologie des Menschen,
Thieme, Stuttgart 1974

21 Lessertisseur,J.,Saban,R.

Mammifères,Téguments,Squelette,
Traité de Zoologie,1.Bd, Hrsg.Grassé,P.P.
Paris 1967

22 Neumann,K.

Anwendung der Gefriertrocknung für histochemische Untersuchungen,
Handbuch der Histochemie,Bd.1,Allgemeine Methodik,1.Teil, Hrsg.Graumann,W.
G.Fischer, Stuttgart 1958

23 Nemetschek,T.,Bowitz,R.

Struktur und Dehnungsverhalten von Kollagen,
Biopolymere und Biomechanik von Bindegewebssystemen, Hrsg.Hartmann,F.
Springer, Berlin-Heidelberg-New York 1974

24 Romeis,B.

Mikroskopische Technik,
R.Oldenburg, München-Wien 1968

25 Schneider,H.

Zur Struktur der Sehnenansatzzonen,
Z.Anat.Entw.-Gesch.119 (1956) 431

26 Senst,W.

Zbl.Chir.99 (1974) 275

27 Sharpey,W.,Ellis,G.V.

Elements of Anatomy by Joint Quain,Ed.6,Vol.1,
London,Walton,Morberly 1856

28 Stark,D.,Frick,H.

Repetitorium anatomicum,
Thieme, Stuttgart 1972

29 Verzar,F.

The Aging of Connective Tissue,
Kongr.Int.Ass.Geront.,
Meran 1957

30 Witt,A.N.,Rettig,H.

Unterarm und Hand,
Handbuch der Orthopädie,Bd.3,
Hrsg.Hohmann,G.,Hackenbroch,M. sen.,Lindemann,K.
Thieme, Stuttgart 1959

31 Witt,A.N.

Der Radiussporn beim Krukenberg-Greifarm,
Zbl.Chir.73 (1948) 400

32 Witt,A.N. et al.

Langzeitbeobachtungen an Krukenberg-Greifarmen,
1972;

Lebenslauf

Am 19.Februar 1953 wurde ich in München geboren.
Nach 4-jährigem Besuch der Volksschule trat ich 1963 in das Albert-Einstein-Gymnasium in München ein, wo ich 1972 das Abitur bestand.
Im Oktober 1972 begann ich an der Ludwig-Maximilians-Universität mit dem Studium der Humanmedizin.
Am 19.Oktober 1978 bestand ich in München die Ärztliche Prüfung. Am 23.Oktober 1978 erhielt ich die Approbation als Arzt.
Seit dem 27.November 1978 arbeite ich als Stabsarzt bei der Bundeswehr.

Die vorliegende Arbeit entstand an der
Orthopädischen Klinik der Ludwig-Maximilians-
Universität München ,
Direktor : Prof.Dr.med. A.N.Witt .

Herrn Privat-Dozent Dr.med. W.Küsswetter
danke ich für die stets freundliche Unterstützung.

Weiterhin bedanke ich mich bei Frau Suchar
für die Anfertigung der histologischen Präparate.